

发电机低励限制功能的设置原则

王青, 刘肇旭, 孙华东, 吴丽华, 马世英, 李柏青

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 电网实际运行中多次发生因发电机低励限制功能设置不当导致机组运行异常甚至掉机的严重后果。分析了低励限制的应用目标, 比较了不同类型低励限制器的功能特点。将低励限制的性能要求划分为静态和动态两方面, 提出了相应的设置原则: 静态性能遵循在有功出力全范围合理定义、满足定子端部热稳定, 满足系统静稳定、根据机端电压变化调整、与失磁保护协调配合原则设置限制线; 动态性能遵循保证控制系统稳定性、优选控制结构、防止严重影响 PSS 作用、避免暂态期间不必要动作原则优化控制器结构和参数。

关键词: 低励限制; 设置原则; 静态性能; 动态性能; 励磁控制系统; 电力系统

General principle of generator under excitation limiter settings

WANG Qing, LIU Zhao-xu, SUN Hua-dong, WU Li-hua, MA Shi-ying, LI Bai-qing
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In the real power system operation, incorrect function settings for Under Excitation Limiter (UEL) will result in an abnormal operation of the unit even load rejection. The paper analyzes the application objective of the UEL, compares the function characteristics of different types of UEL. The performance requirement of UEL is viewed from two aspects, namely, the static aspect and the dynamic aspect. Corresponding setting principles are proposed as follows: as for the static performance, the limit line is set by conforming to the rules of defining reasonably in the whole scope of active power output, meeting the need of the stator end thermal stabilization and the static stability of the system, adjusting with the changes of terminal voltage, and coordinating with loss of excitation protection; as for the dynamic performance, the structure and parameters of the controller are optimized based on the principles of guaranteeing the stability of the control system, selecting the control structure optimally, preventing seriously weakening the PSS function, and avoiding the unnecessary operation during the transient period.

Key words: under excitation limiter; setting principle; static performance; dynamic performance; excitation control system; power system

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0055-06

0 引言

励磁控制系统是发电机的重要组成部分, 其主要功能有: 维持机端或者其他控制点电压在给定水平; 控制并联运行机组无功功率分配; 提高系统的功角稳定性和电压稳定性; 保护机组自身的安全等。励磁控制系统对于机组和电网的安全稳定影响重大, 在电力系统分析和控制领域, 励磁控制系统的研究始终占有重要地位^[1-8]。

随着研究的深入和励磁控制技术的进步, 现代大型机组的励磁控制系统的性能比以往有了很大的改进, 并且具备了多项辅助的功能, 其中一种重要的功能是低励限制^[9-13], 用于防止励磁水平过低威

胁机组自身和系统的安全。以往在工程实际中曾多次出现因低励限制功能设置不当导致机组运行异常甚至掉机的严重后果。例如澳大利亚西部 Mungarra 电站安装的两台燃气轮机在运行中曾因低励限制原因出现机组的有功功率、无功功率、电压等电气量持续振荡^[12], 我国福建、四川等地有电厂机组因低励限制原因在运行中掉闸^[14-15]。而以往关于正确设置低励限制功能的系统性研究较少, 大多针对的是具体型号产品的分析, 或者局限于从单一某个方面进行讨论。

本文将首先分析低励限制的应用目标和功能特点, 在此基础上, 提出工程实际中设置低励限制功能的一般原则, 为正确发挥低励限制功能提供参考。

1 低励限制的功能特点

发电机运行中会有励磁水平偏低的情况：(1) 电网在负荷低谷期，常规感性无功补偿设备投入量不足时存在电压偏高问题，此时常采取发电机降低励磁进相运行的调压措施；(2) 系统因扰动或故障电压突然升高时，发电机励磁调节器会自动响应降低励磁；(3) 励磁调节器故障引起励磁水平降低。发电机工作于低励磁区存在几个问题，首先，发电机定子端部铁芯由于漏磁的增大发热量会显著增加，使温度升高，有可能超过最大允许值；其次，如果进相较深，励磁电流过小，有可能达到系统静态稳定极限，发生稳定破坏事故；此外还增大了失磁保护误动的可能性。作为发电机励磁控制系统的重要辅助功能，低励限制器又称为欠励限制器，就是针对上述问题提出的，当低励限制器检测到机组励磁水平降低到动作值时就产生控制作用增大励磁使机组运行点回到允许范围，提高机组和系统的安全性。

低励限制器按照接入励磁调节系统的方式可划分为两种类型：选择门接入方式类型和叠加接入方式类型。

选择门接入方式指低励限制器输出信号 U_{UEL} 与励磁调节器正常调压信号 U_{AVR} 通过选择门（高电平选通或低电平选通）两选一的方式。当机组吸收的无功功率 Q 达到并超过低励限制线上的动作阈值 Q_{UEL} 时， U_{UEL} 将通过选择门， U_{AVR} 被切断，低励限制器控制励磁系统增加励磁，增大无功输出。该方式控制逻辑简单，易于实施，不足之处是在它作用期间 AVR 和/或 PSS 作用无法发挥，有可能降低系统的稳定性。ABB 公司生产的 Unitrol 5000 型数字式励磁调节器采用的低励限制器就属于此类型。

叠加接入方式是指低励限制器输出信号 U_{UEL} 与励磁调节器正常调压信号 U_{AVR} 叠加在一起共同作用的方式。当机组吸收的无功功率 Q 未超过低励限制线上的动作阈值 Q_{UEL} 时， $U_{UEL} = 0$ ，低励限制器不起作用，否则有 $U_{UEL} > 0$ ，低励限制器产生增大励磁的作用。该方式的最大优点是在低励限制器作用期间 AVR 和 PSS 的作用能够仍然有效，有利于系统的稳定性，但是整定相对复杂，需与励磁调节器综合考虑。GE 公司生产的 EX2000 型数字式励磁调节器采用的低励限制器就属于此类型。

要使低励限制器发挥理想的作用，一方面需要为低励限制器设置合理的限制线，保证良好的静态性能，另一方面应优化设计控制结构和参数，获得

良好的动态性能，下面从这两方面分别进行讨论。

2 低励限制静态性能要求

低励限制线应根据发电机定子端部发热限制和系统静态稳定极限确定^[16-17]，它是关于发电机有功出力 P 和机端电压 U_t 的函数： $Q_{UEL} = f_{UEL}(P, U_t)$ ，在某个工况点下，低励限制线上对应一个 Q_{UEL} ，如果 $Q < Q_{UEL}$ 并且达到动作条件，则低励限制器动作增加励磁，抬高机端电压，减小机组吸收的无功值。

低励限制线可分为直线型、圆周型和折线型三种，从充分利用机组容量角度出发，宜采用圆周型或折线型，由于目前主流励磁控制系统均为数字式，因此很容易实现此要求。

设置低励限制线的一般原则可概括为：在有功出力全范围合理定义、满足定子端部热稳定限制要求、满足静态稳定限制要求、根据机端电压变化进行调整、与失磁保护协调配合。

2.1 在有功出力全范围合理定义

设置低励限制线时，应在机组有功出力可能变化范围合理定义，避免出现不合理的定义区段。2006 年四川某电厂曾发生因低励限制线定义区段不合理导致机组跳闸的事故，下面对此进行较为详细的分析。

该机组额定视在功率 353 MVA，额定有功功率 300 MW，最大连续有功功率 330 MW，低励限制器为选择门接入方式。事故发生时系统负荷水平较低，机组正在执行从 300 MW 向 330 MW 增出力的操作，观察到该机组有功功率从 315 MW 开始波动，随之机端电压、励磁电压、励磁电流、无功功率均产生大幅波动，最后导致发电机跳闸。分析事故原因发现是低励限制器的限制线定义区段不合理所致。限制线在额定有功附近设置了两个点，A 点处 $P = 1.0P_n$ ， $Q = -0.3Q_n$ ，B 点处 $P = 1.05P_n$ ， $Q = 0$ ，对于 $P > 1.05P_n$ 区段没有明确设置，根据默认规则沿 AB 线段延长取值，这就使得低励限制线在 $P > 1.05P_n$ 区段， $Q > 0$ 并且变化率较大，一旦机组大出力运行进入该区段达到低励限制器动作值便会引起低励限制器动作，切断 AVR 通道，控制机组无功出力增至低励限制线上的阈值，随后低励限制器退出 AVR 重新投入，在机组出力从 315 MW 增至 330 MW 期间，发生了低励限制器和 AVR 来回切换，导致机组出力和电压大幅变化，最终导致机组跳闸。后来的解决办法是改变低励限制线上 B 点处的设置为 $P = 1.05P_n$ ， $Q = -0.25Q_n$ 。图 1 给出了低励限制线在高功率区段修改设置前后两种情况的比较，设置 1 线段为原始情况，2 线段为修改后的情况。

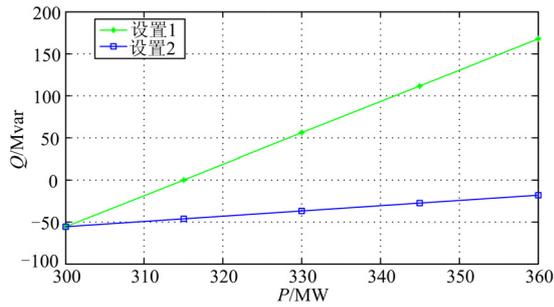


图1 低励限制线修改前后的比较

Fig.1 Comparison of UEL characteristics with different settings

2.2 满足定子端部热稳定限制要求

当励磁电流减小发电机进相运行时,原来起到去磁作用的电枢反应将会逐渐减弱并向增磁方向变化,定子铁芯中的磁通密度将会明显增加,特别是端部铁芯部分,引起比其他部位更为显著的升温。机组定子端部铁芯允许的最高温度构成热稳定限制要求,具体参数与发电机的类型、结构、冷却方式及容量等因素有关,应通过实测或者由发电机制造厂家提供。在 PQ 平面当热稳定限制曲线位于静态稳定极限曲线之上,即机组进相运行先到达热稳定限制时,低励限制线应按热稳定限制曲线设置,位于该热稳定限制曲线之上并适当留有一定的裕度。

2.3 满足静态稳定限制要求

在 PQ 平面当静态稳定极限曲线位于热稳定限制曲线之上时,低励限制线应按静态稳定极限曲线设置,使低励限制线处于静态稳定极限曲线上部,且留有一定裕度,建议参照《电力系统安全稳定导则》对事故后运行方式和特殊运行方式静态稳定储备系数不低于 10% 的要求掌握^[18]。考虑使所设置的低励限制线对运行方式变化有足够的裕度,并且便于与失磁保护协调配合,工程中采用基于不计 AVR,即空载电势 E_q 恒定的假设条件计算静态稳定极限曲线的方法^[9],容易推知静态稳定极限曲线方程为圆方程:

$$P^2 + (Q - Q_0)^2 = R^2 \quad (1)$$

式中: $Q_0 = \frac{U_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_s} - \frac{1}{x_d} \right)$; $R = \frac{U_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_d} \right)$; x_d 为发电机的同步电抗; x_s 为发电机与系统间的联系电抗; U_t 为机端电压。静态稳定极限曲线与 Q 轴的交点 A 处的无功值 $Q_A = -\frac{1}{x_d} U_t^2$, 实际上该点为失磁状态点,静态稳定极限曲线与 P 轴的交点 B 处的

$$\text{有功值为 } P_B = \frac{U_t^2}{\sqrt{x_d x_s}}。$$

静态稳定限制条件要求机组运行在静态稳定极限曲线以内,由于发电机与系统间电气联系的减弱会使静态稳定极限曲线上移,使机组允许进相范围减小,因此设置低励限制时应考虑机组与系统联系较弱的小负荷方式。图 2 给出了一个算例系统中机组与系统间联系电抗变化时静态稳定极限曲线的变化情况。

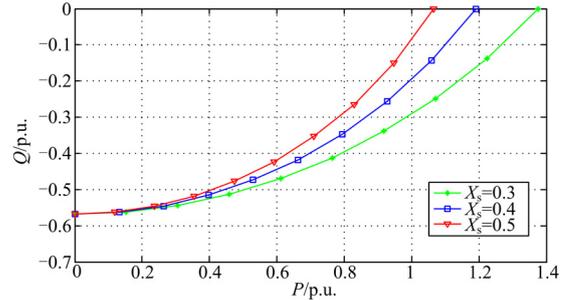


图2 机组与系统不同联系电抗时的静态稳定极限

Fig.2 Steady-state stability limit with different connection reactance

2.4 根据机端电压变化进行调整

低励限制线应随机端电压的变化进行调整,因为电压变化会直接影响机组的进相能力,比如电压减小机组允许吸收的最大无功也将减小,此时应将低励限制线上移,保证在机端电压允许的变化范围内(例如 $0.95U_n \sim 1.05U_n$),低励限制线始终与定子端部热稳定限制和静态稳定限制配合良好。工程上目前应用效果较好的调整公式为:

$$Q_{UEL} = U_t^m f_{UEL} \left(\frac{P}{U_t^m} \right), \text{ 其中系数 } m \text{ 根据低励限制线}$$

设置时是基于热稳定限制条件还是静态稳定限制条件分别取为 1 或 2。

2.5 与失磁保护协调配合

发电机由于灭磁开关误跳、转子励磁绕组短接、励磁绕组回路开路以及交流励磁电源消失等原因会发生失磁故障,对发电机自身和系统稳定运行构成很大的威胁。发电机失磁保护是检测机组是否发生失磁并采取例如发出报警信号、一定时限跳机等措施的重要保护。失磁保护的主要动作判据有机端测量阻抗判据、励磁电压判据和系统电压判据等^[19],最为常用的是机端测量阻抗判据,测量机端的等效阻抗变化轨迹,如果落入预先设计的动作区则动作。测量阻抗判据的动作判断曲线包括静态稳定极限阻抗曲线和异步边界阻抗曲线两种。

失磁保护与低励限制的协调配合是指:随着机

组励磁电流减小，机组进入进相区并且进相深度逐渐增大，要求在任何工况和扰动情况下低励限制均先于失磁保护动作。由于失磁保护动作判断曲线是在阻抗平面设置的，而低励限制的限制线是在功率平面设置的，要研究两者的配合关系就必须进行坐标变换，将两者统一到阻抗平面或者功率平面上，在此基础上满足如下配合关系：在阻抗平面，低励限制线应位于失磁动作判断曲线之外；在功率平面，低励限制线应位于失磁动作判断曲线之内。

(1) 统一到阻抗平面

将低励限制线转换到阻抗平面，易推得转换公式为：

$$R = \frac{U_t^2 P}{P^2 + Q^2}, \quad X = \frac{U_t^2 Q}{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

式中， R 和 X 分别为机端等效电阻和等效电抗。

例如对于常用的圆周型低励限制线方程：

$$P^2 + (Q - Q_0 U_t^2)^2 = (R_0 U_t^2)^2 \quad (3)$$

可推导转换到阻抗平面的转换方程为：

$$R^2 + (X - x_0)^2 = r^2 \quad (4)$$

式中： $x_0 = \frac{-Q_0}{R_0^2 - Q_0^2}$ ； $r = \frac{R_0}{R_0^2 - Q_0^2}$ 。

这样就可以在阻抗平面检查是否满足低励限制线位于失磁动作判断曲线之外的配合要求。

(2) 统一到功率平面

将失磁动作判断曲线由阻抗平面转换到功率平面，易推得转换公式为：

$$P = \frac{U_t^2 R}{R^2 + X^2}, \quad Q = \frac{U_t^2 X}{R^2 + X^2} \quad (5)$$

例如对于常用的隐极机异步边界阻抗圆方程：

$$R^2 + (X - x_0)^2 = r^2 \quad (6)$$

式中： $x_0 = -\frac{1}{2}(x'_d + x_d)$ ； $r = \frac{1}{2}(x'_d - x_d)$ 。

可推导转换到功率平面的转换方程为：

$$P^2 + (Q - Q_0)^2 = R^2 \quad (7)$$

式中： $Q_0 = -\frac{U_t^2}{2} \left(\frac{1}{x'_d} + \frac{1}{x_d} \right)$ ； $R = \frac{U_t^2}{2} \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right)$ 。

这样就可以在功率平面检查是否满足低励限制线位于失磁动作判断曲线之内的配合要求。

3 低励限制动态性能要求

为保证低励限制器有良好的动态性能，应优化

设计控制结构和参数，遵循以下四点原则：保证控制系统的稳定性、优选控制结构提高控制精度、防止严重影响 PSS 的作用、避免暂态过程期间低励限制器不必要的动作。

3.1 保证控制系统的稳定性

低励限制器有选择门接入方式和叠加接入方式两种，无论何种类型首先需要保证励磁调节系统在低励限制器动作后的稳定性，如果设置不当，控制器将无法稳定工作，甚至引起机组跳闸的严重后果。澳大利亚西部 Mungarra 电站发生的振荡事故，其原因就在于叠加接入式的低励限制器参数设置不当，导致了控制系统的不稳定，事故后现场采取的解决措施是降低低励限制器增益为原设定值的 1/4^[12]。

图 3~图 5 给出了一台额定容量为 550 MW 机组在其励磁参考电压降低 3% 的阶跃扰动下，选择门接入式低励限制器正常作用的仿真结果，扰动后低励限制器取代了励磁调节器的调压作用，有效控制了机组的进相深度。图 6 为当低励限制器的增益增大为正常设定值 2 倍时的仿真结果，此时因增益过大引起了控制系统失稳。因此，应特别重视低励限制器增益的合理设置。

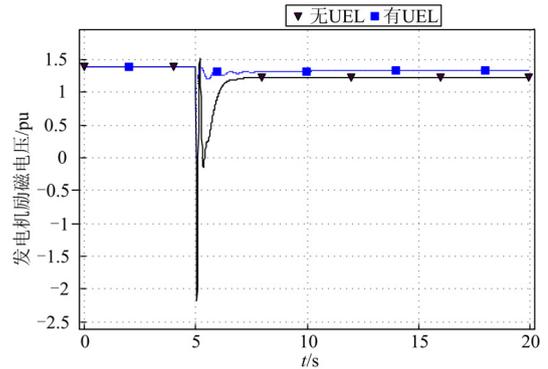


图 3 发电机励磁电压曲线

Fig.3 Generator excitation voltage curve

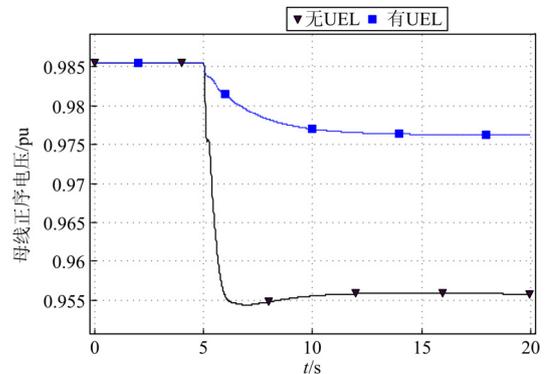


图 4 发电机机端电压曲线

Fig.4 Generator terminal voltage curve

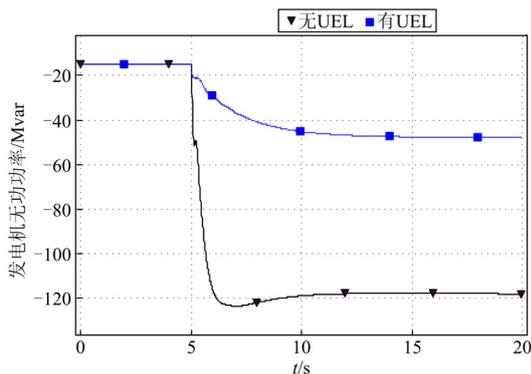


图5 发电机无功功率曲线

Fig.5 Generator reactive power curve

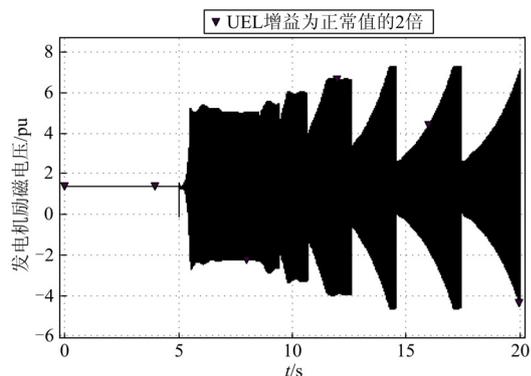


图6 发电机励磁电压曲线

Fig.6 Generator excitation voltage curve when increasing UEL gain

3.2 优选控制结构提高控制精度

低励限制器常用的控制结构有两类,一类是比例偏差型,属于有差调节,参数整定时需要考虑控制的实际效果与控制目标间的差距,控制准确度不高;另一类是比例积分型,属于无差调节,低励限制器动作后可将无功功率严格控制到整定目标值上,无需设置裕度,因此从精确控制角度出发,宜采用后一种类型的控制结构。

3.3 防止严重影响 PSS 的作用

随着电网互联规模的扩大、新技术应用带来不确定因素的增多和受环保经济因素制约运行点日趋趋于稳定极限,电力系统动态稳定已成为当前威胁电网安全稳定运行的突出问题,而电力系统稳定器(PSS)是保证和提高系统动态稳定水平最基本的措施,从保证系统始终具有足够的动态稳定性的需求出发,要求低励限制器动作时不应严重影响 PSS 正常的作用。对于叠加接入方式的低励限制器,由于低励限制器输出信号是叠加在含有 PSS 输出信号的励磁调节器正常调压信号之上的,因此不会切断 PSS 作用通道。但是有的选择门接入方式的低励限

制器设计不尽合理,将 PSS 输出信号接入到比较门之前,这样在低励限制器动作后会切断 PSS 信号通道直至低励限制器控制作用退出,在此期间机组相当于没有投入 PSS,会降低与该机相关机电振荡模式的阻尼,存在引发低频振荡的风险。对此情况,应采用将 PSS 输出信号接入到比较门之后的方法予以改进。

3.4 避免暂态过程期间低励限制器不必要的动作

在暂态过程中,有可能出现机组运行变量剧烈变化,机组运行点短时超过低励限制线又回落到正常区域的现象,可延用以设计延时环节^[13-14]的方法防止暂态过程期间低励限制器不必要的动作,干扰 AVR 正常的调节作用。

4 结论

针对机组励磁水平过低可能出现定子端部过热、静态稳定破坏和失磁保护误动风险增大问题,发电机励磁控制系统配置了低励限制功能,增强了机组应对特殊工况条件的能力,但如果设置不当有可能成为事故隐患。本文从设置原则角度对低励限制功能进行了研究,提出了满足静态性能和动态性能两方面要求的设置原则。静态性能方面要求设置合理的低励限制线,遵循:(1)在有功出力全范围合理定义;(2)满足定子端部热稳定限制要求;(3)满足静态稳定限制要求;(4)根据机端电压变化进行调整;(5)与失磁保护协调配合。动态性能方面要求优化设计控制结构和参数,遵循:(1)保证控制系统的稳定性;(2)优选控制结构提高控制精度;(3)防止严重影响 PSS 的作用;(4)避免暂态过程期间低励限制器不必要的动作。本文的研究可为工程实际中合理设置低励限制功能提供参考。

参考文献

- [1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] DEMELLO F P, CONCORDIA C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. IEEE Transactions on PAS, 1969, 88 (4): 316-329.
- [3] IEEE Task Force on Digital Excitation Systems. Computer models for representation of digital-based excitation systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11 (3): 607-615.
- [4] IEEE Std. 421.5-2005. IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies[S].
- [5] IEEE Std 421.4-2004 IEEE guide for the preparation of excitation system specifications[S].

[6] 揭海宝, 郭清滔, 康积涛, 等. 基于模糊自调整PID控制的同步发电机励磁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 89-92.
JIE Hai-bao, GUO Qing-tao, KANG Ji-tao, et al. Simulation of synchronous excitation controller based on fuzzy self-regulation PID control[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 89-92.

[7] 石雪梅, 汪志宏, 桂国亮, 等. 发电机励磁系统数学模型及参数对电网动态稳定性分析结果影响的研究[J]. 继电器, 2007, 35(21): 22-27.
SHI Xue-mei, WANG Zhi-hong, GUI Guo-liang, et al. Research on the influence of generators based on detailed excitation system models and parameters to power grid dynamic stability[J]. Relay, 2007, 35(21): 22-27.

[8] 陈铁, 舒乃秋. 非线性励磁控制方法的研究[J]. 继电器, 2005, 33(19): 28-30,35.
CHEN Tie, SHU Nai-qiu. Research of the nonlinear excitation based on the direct feedback linearization[J]. Relay, 2005, 33(19): 28-30,35.

[9] IEEE Task Force on Excitation Limiters. Under excitation limiter models for power system stability studies[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1995, 10 (3) : 524-531.

[10] BERUBE G R, HAJAGOS L M, BEAULIEU R E. A utility perspective on under-excitation limiters[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1995, 10 (3) : 532-537.

[11] CHOI S S, JIA X M. Under excitation limiter and its role in preventing excessive synchronous generator stator end-core heating[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (1) : 95-101.

[12] CHOI S S, LARKIN R, BASTICK M T, et al. Effects of underexcitation limiters on operation of remote generating station[J]. IEE PROCEEDINGS-C, 1991, 138 (6) : 560-566.

[13] MOZINA C J, REICHARD M, BUKHALA Z, et al. Coordination of generator protection with generator excitation control and generator capability[C]. //2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, IEEE PES, Tampa, United States, 2007.

[14] 宋福海. 水口水电厂7号机组励磁系统异常分析[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28 (6) : 8-11.
SONG Fu-hai. Analysis on excitation system abnormality of unit 7 in the Shuikou hydropower station. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2004, 28 (6) : 8-11.

[15] 中国电力科学研究院. 《电力系统安全稳定导则》修编电网协调研究报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.

[16] DL/T650-1998 大型汽轮发电机自并励静止励磁系统技术条件[S].

[17] DL/T843-2003 大型汽轮发电机交流励磁机励磁系统技术条件[S].

[18] DL 755-2001 电力系统安全稳定导则[S].

[19] DL/T684-1999 珠笔大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].

收稿日期: 2010-04-09; 修回日期: 2010-05-30

作者简介:

王青(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制; E-mail: wangqing@epri.sgcc.com.cn

刘肇旭(1941-), 男, 教授级高级工程师, CSEE和IEEE高级会员, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制;

孙华东(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制。

(上接第54页 continued from page 54)

[10] 范文涛, 程林, 孙元章. 电网改造简化经济分析方法研究[J]. 继电器, 2004, 32 (19): 80-84.
FAN Wen-tao, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Research on simplified economic evaluation for power grid renovation[J]. Relay, 2004, 32 (19): 80-84.

[11] 万国成, 任震, 黄金凤. 配电网投资决策[J]. 继电器, 2002, 30 (10): 6-9.
WAN Guo-cheng, REN Zhen, HUANG Jin-feng. Study on decision-making of investment of distribution sub-system [J]. Relay, 2002, 30 (10): 6-9.

[12] 彭士禄. 2×600MW 压水堆核电厂上网电价计算与分析[J]. 核动力工程, 1993, 14 (2): 97-106.

PENG Shi-lu. Calculation and analysis of electric price in connection-grid of 2×600MW PWR nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 1993, 14 (2): 97-106.

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-06-23

作者简介:

熊莉(1984-), 女, 博士研究生, 从事核电站建模、电力系统仿真计算、电力系统稳定控制等研究; E-mail: xiongli1102@163.com

刘涤尘(1953-), 男, 教授, 从事电力自动监控技术、电力系统稳定与控制、电力电子技术应用等研究。